

## DEFORMASI GELOMBANG DI PANTAI MAKASSAR

Frans Rabung, A.B. Muhiddin, M.P. Hatta, S. Malik

Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin  
Jl. Perintis Kemerdekaan Km. 10 Tamalanrea - Makassar, 90245  
Telp./Fax: (0411) 588111  
e-mail: frabung@yahoo.com

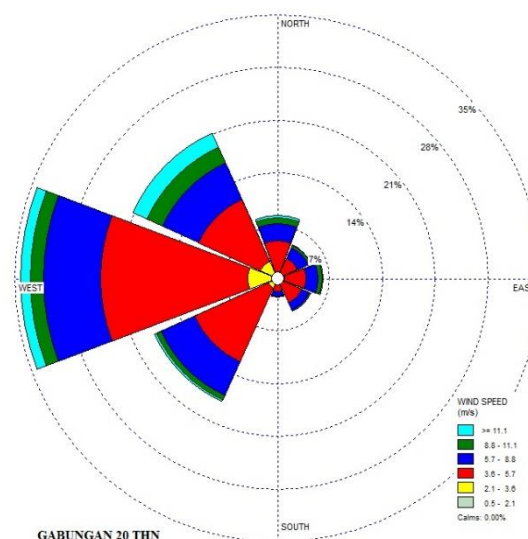
### Abstrak

Penelitian ini melanjutkan hasil dua penelitian sebelumnya yaitu “Pola Angin Pembangkit Gelombang Yang Berpengaruh Atas Morfologi dan Bangunan Pantai di Sekitar Makassar” dan “Prediksi Gelombang-gelombang Signifikan Sekitar Pantai Makassar untuk Perencanaan Pembangunan Infrastruktur Pantai”. Pada penelitian ini dianalisa pengaruh-pengaruh morfologi dan dasar laut dari pantai sekitar Makassar terhadap perjalanan gelombang-gelombang signifikan dari laut dalam hingga ke pantai, sehingga dapat diketahui tinggi dan arah gelombang yang langsung berpengaruh terhadap pantai dan bangunan di atasnya.

**Katakunci:** gelombang, shoaling, difraksi, refraksi, gelombang pecah

### PENDAHULUAN

Dalam tulisan terdahulu (Rabung and Nurfan, 2012) telah ditunjukkan bahwa meskipun secara umum teori-teori tentang angin musim di Indonesia mengatakan bahwa pada musim kemarau (April - Oktober) angin kering bertiup dari Tenggara (sekitar benua Australia) lalu setelah melewati garis katulistiwa berbelok menjadi dari arah Barat Daya, dan pada musim hujan (Oktober – April) angin basah bertiup dari Timur Laut (lautan Pasifik) lalu setelah melewati garis katulistiwa berbelok menjadi dari arah Barat Laut, namun di pantai Makassar data angin kontinyu selama 20 tahun membuktikan bahwa teori-teori itu tidak sepenuhnya benar. Akibat karakter Indonesia yang kepulauan, banyaknya pulau dan selat mempengaruhi arah dan besarnya angin, sehingga pada setiap pantai akan unik adanya. Untuk pantai Makassar keadaannya ditunjukkan pada Gambar 1 sebagai hasil pengolahan data dari BMKG Wilayah IV Makassar, dimana arah angin terbanyak dan terbesar berasal dari Barat, Barat Laut dan Barat Daya berturut-turut.



**Gambar 1.** Windrose dari seluruh data angin terbesar selama 20 tahun  
(Sumber: Rabung and Nurfan, 2012)

Tulisan selanjutnya (Rabung, Pongmanda and Suprpti, 2014) menyajikan hasil-hasil peramalan gelombang dari data angin dengan dua metode yaitu metode *Fastest Mile Wind Speed* menggunakan data *wind gust* terbesar dan metode Kecepatan Angin Rata-rata Harian Terbesar. Peramalan gelombang menggunakan nomograms *Sverdrup-Munk-Bretschneider* (SMB method) menurut SPM (CERC, 1984, Fig. 3-23) menghasilkan:

*Fastest Mile Wind Speed method* :  $H_{mo} = 2,3$  m dengan  $T_m = 4,7$  s

Kecepatan Angin Rata-rata Harian Terbesar :  $H_{mo} = 3,0$  m dengan  $T_m = 9$  s

$H_{mo}$  adalah *energy-spectral-based significant-wave height* dan  $T_m$  adalah *peak period of the wave spectrum*. Metode SMB memberikan hasil  $H_{mo}$  yang lebih besar, maka harga itulah yang menjadi dasar pembahasan selanjutnya. Ada pendapat bahwa periode gelombang  $T$  yang lebih cepat akan memberikan dampak yang lebih besar, akan tetapi model-model fisik sejak Hudson sampai Van Gent pada pemecah gelombang gundukan batu menunjukkan bahwa pengaruh itu dapat diabaikan, demikian pula pada pantai pasir rumus-rumus *equilibrium beach profile* dari Bruun dan Dean tidak mengandung pengaruh faktor  $T$ . Tentu saja masih ada kemungkinan bahwa terjadi gelombang-gelombang yang lebih besar dengan probability yang lebih kecil, tetapi dalam perencanaan konstruksi-konstruksi pelindung pantai dengan gundukan batu (*rubble-mound breakwater* atau *revetment*) atau pantai pasir seimbang (*equilibrium beach profile*) umumnya dipakai gelombang signifikan saja. Gelombang signifikan  $H_{mo}$  yang berdasarkan spectrum energi gelombang dapat dianggap sama dengan gelombang signifikan yang berdasarkan perhitungan statistik  $H_s$  (CERC, 1984, Eq. 3-14) yang mengikuti *Rayleigh Distribution*.

Kalau memang dibutuhkan gelombang-gelombang yang lebih besar untuk keamanan perencanaan, maka hubungan-hubungan statistik *Rayleigh Distribution* dapat digunakan berdasarkan gelombang akar rata-rata kwadrat ( $H_{rms}$ ), dimana:

$$H_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N H_j^2} \quad (1)$$

Selanjutnya hubungan antara harga rata-rata dari  $n\%$  gelombang terbesar ( $H_n$ ) dengan gelombang akar rata-rata kwadrat ( $H_{rms}$ ) dan  $H_s$  dapat dihitung sebagai berikut (Tabel 1):

**Tabel 1:** Hubungan antara  $H_{rms}$  dan  $H_s$  dengan  $H_n$   
(Sumber: CERC, 1984, pp 3-6 – 3-15)

Simbol	n %	$H_n/H_{rms}$	$H_n/H_s$
$H_1$	1	2,36	1,67
$H_{10}$	10	1,80	1,27
$H_s \sim H_{mo}$	33	1,416	1
$\bar{H}$	100	0,886	0,63

Berdasarkan data dari dua tulisan terdahulu yang disebutkan di atas, tulisan ini selanjutnya menganalisis deformasi (perubahan bentuk) gelombang laut dalam itu dalam perjalanannya dari laut dalam menuju pantai Makassar. Hal yang unik dengan pantai Makassar ialah bahwa ia dilindungi oleh ratusan pulau-pulau kecil yang bertebaran di laut sebelah luar (Kepulauan Spermonde), sedang sebelah dalam ada deretan pulau karang (seperti pulau Lae-lae, pulau Kayangan) dan *sand bars* (gusung Panyoa, gusung Trabanusa dan lain-lain) yang berjajar sebagai pelindung pantai pada jarak sekitar satu sampai dua kilometer dari pantai. Situasi ini menyulitkan untuk melakukan analisis secara manual yang hanya dapat meninjau keadaan satu per satu, sehingga tulisan ini mencoba menyelesaikan persoalan dengan menggunakan aplikasi komputer *Surface Water Modelling System (SMS)*.

## DEFORMASI GELOMBANG

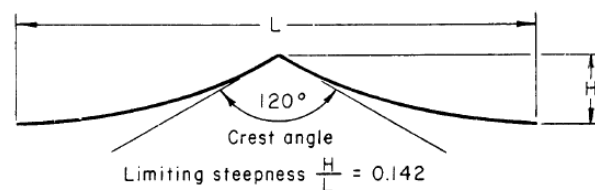
Deformasi gelombang adalah perubahan karakteristik gelombang seperti tinggi, panjang, periode, arah dan sebagainya akibat pengaruh perubahan kedalaman dasar laut, adanya hambatan pulau-pulau atau tanah meninggi di dasar laut, kemiringan dasar laut yang tidak sejajar dengan arah datangnya gelombang, dan lain-lain. Deformasi gelombang yang sering dihadapi adalah Gelombang Pecah, Shoaling, Difraksi, Refraksi dan Refleksi Gelombang. Secara manual masalah-masalah ini harus diselesaikan satu per satu, berurutan sesuai terjadinya. Teori-teori konvensional yang ada tidak memberikan suatu cara penyelesaian simultan bagaimana menghitung efek dari Shoaling, Difraksi dan Refraksi misalnya sekaligus.

**Gelombang Pecah** adalah bentuk deformasi gelombang yang paling ekstrim. Pada saat suatu gelombang pecah dia melepas seluruh energinya sekaligus kepada apa saja yang ada di sekitarnya. Kalau yang ada di sekitarnya adalah dinding (misalnya pemecah gelombang dinding beton) maka pelepasan energi itu akan diterima oleh dinding tersebut berupa pukulan yang keras; kalau yang ada adalah pemecah gelombang gundukan batu dengan kemiringan relatif landai atau pantai berpasir, maka energi itu dapat terserap kedalam pori-pori batuan atau pasir dengan tenang (*wave energy dissipation*). Kalau yang ada di sekitarnya hanya air maka energi itu akan lepas ke udara dan air sekitarnya. Setelah suatu gelombang pecah maka dia dipandang telah lenyap, walaupun sebenarnya sisa-sisa energinya dapat berupa gerakan air translasi (disebut arus) di tepi pantai atau diserap oleh gelombang-gelombang lebih kecil di sekitarnya. Walaupun suatu gelombang telah lenyap karena pecah, namun gelombang-gelombang lain yang lebih kecil tetap berjalan terus sampai terjadi kondisi yang mengharuskannya juga pecah.

Kondisi yang menyebabkan suatu gelombang pecah dapat terjadi di laut dalam atau di laut dangkal. **Laut dalam** adalah perairan dimana rasio antara **kedalaman air (d)** dengan **panjang gelombang (L)** lebih besar dari 0,5 ( $d/L > 0,5$ ). **Laut dangkal** adalah bila rasio antara kedalaman dan panjang gelombang lebih kecil dari 0,05 ( $d/L < 0,05$ ). Laut dengan kedalaman di antaranya disebut **laut transisi** ( $0,05 < d/L < 0,5$ ).

Kondisi yang menyebabkan gelombang pecah di laut dalam (Gambar 2) adalah kecuraman gelombang yang melampaui yang diberikan oleh persamaan:

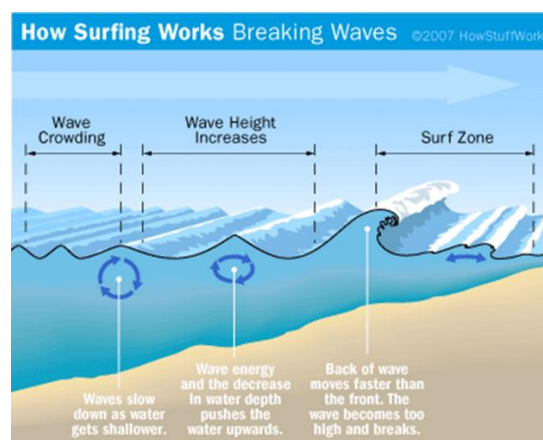
$$\frac{H_o}{L_o} = 0,142 \approx \frac{1}{7} \quad (2)$$



**Gambar 2.** Kondisi untuk gelombang pecah di laut dalam  
(Sumber: CERC, 1984, p.2-129)

Di laut dangkal atau transisi, kedalaman air yang semakin berkurang mulai mempengaruhi gelombang (Gambar 3). Gesekan tanah dasar laut menyebabkan lintasan partikel air tidak lagi berupa lingkaran melainkan elips; gelombang semakin tinggi sehingga akhirnya pecah pada keadaan:

$$\frac{d_b}{H_b} = 1,28 \quad \text{atau sering juga dinyatakan dengan} \quad \frac{H_b}{d_b} = 0,78 \quad (3)$$



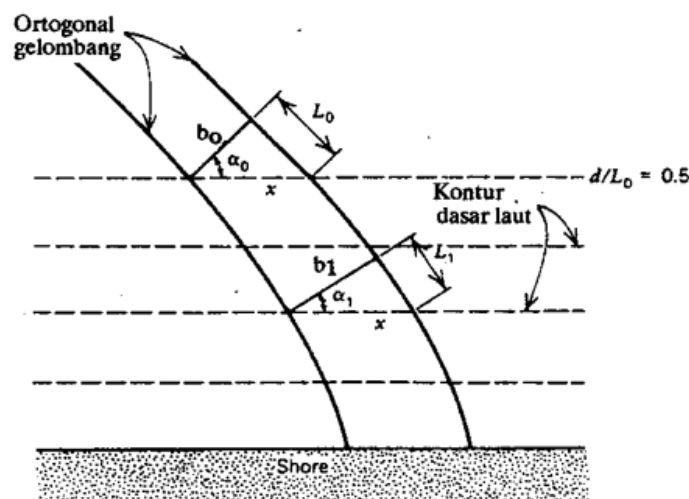
**Gambar 3.** Kondisi untuk gelombang pecah di laut dalam  
(Sumber: Google Image, kata kunci *wave breakers*)

dimana  $d_b$  dan  $H_b$  berturut-turut adalah kedalaman pecah dan tinggi gelombang pecah yang dikenal dengan istilah **Breakers**.

**Shoaling** adalah istilah yang menggambarkan gelombang yang bergerak dari laut dalam memasuki laut dangkal dan mulai mengalami gesekan dari dasar laut. Akibatnya kecepatan gelombang berkurang lalu panjang gelombang pun memendek. Karena energi gelombang belum lepas (gelombang belum pecah) maka tinggi gelombang  $H$  semakin besar, sampai akhirnya pecah seperti yang telah diuraikan pada rumus (3). Sebelum gelombang itu pecah maka tinggi gelombang di suatu tempat di laut transisi atau dangkal dapat dihitung dengan mengalikan tinggi gelombang di air dalam ( $H_0$ ) dengan suatu koefisien  $K_s$  yang dikenal sebagai Koefisien Shoaling. Namun karena prinsip perhitungan  $K_s$  adalah kekekalan energi maka pembahasan harus dilakukan bersamaan dengan Refraksi gelombang.

**Refraksi** gelombang adalah peristiwa berbeloknya arah gelombang akibat arah datangnya gelombang tidak tegak lurus pantai. Gambar 4 mendiskripsikan peristiwa Shoaling dan Refraksi gelombang sekaligus. Akibat arah datangnya gelombang tidak tegak lurus kontur dasar laut maka orthogonal gelombang berbelok untuk mencapai keadaan keseimbangan terhadap gaya-gaya geseran dari dasar laut, terjadilah peristiwa Refraksi gelombang dengan koefisien refraksi  $K_r$ . Sementara itu peristiwa Shoaling juga terjadi karena laut semakin dangkal yang ditunjukkan oleh panjang gelombang  $L_1 < L_0$ . Subscript  $0$  pada Gambar 4 menyatakan keadaan pada laut dalam sedang subscript  $1$  menyatakan laut dangkal. Karena belum ada energi yang lepas maka jumlah energi atau tenaga gelombang di titik  $0$  harus sama dengan di titik  $1$ . Dengan menyamakan rumus energi atau tenaga gelombang di titik  $0$  dan  $1$  dengan mudah akan diperoleh tinggi gelombang di titik  $1$  sebagai berikut:

$$H_1 = K_s K_r H_0 \quad (4)$$



**Gambar 4.** Diagram untuk menjelaskan deformasi gelombang dari laut dalam yang mengalami refraksi dan shoaling sekaligus (Sumber: CEM, 2011)

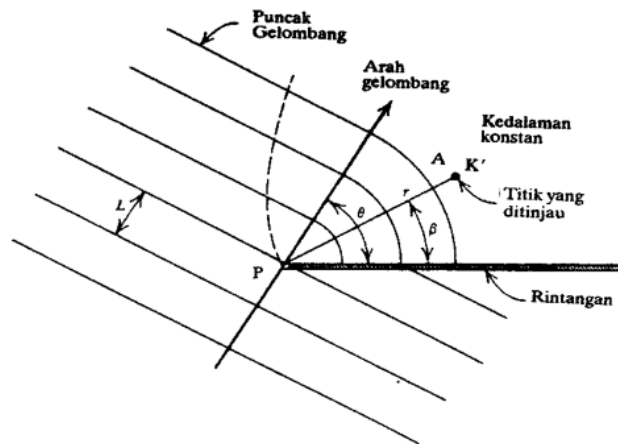
dimana 
$$K_r = \sqrt{\frac{\cos \alpha_0}{\cos \alpha_1}} \quad (5)$$

dan 
$$K_s = \sqrt{\frac{n_0 L_0}{n_1 L_1}} \quad (6)$$

sedang 
$$n = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{4\pi d/L}{\sinh\{4\pi d/L\}} \right] \quad (7)$$

untuk laut dalam  $n_0 = 0,5$ .

**Difraksi** gelombang adalah peristiwa dimana gelombang yang datang terhalang oleh rintangan semisal pemecah gelombang atau pulau, sehingga gelombang tersebut membelok mengelilingi ujung rintangan lalu masuk ke daerah terlindung di belakang rintangan (Gambar 5).



**Gambar 5.** Difraksi gelombang di titik P ujung rintangan ke titik A yang ditinjau (Sumber: Triatmodjo, 2010)

Tinggi gelombang hasil difraksi di titik A yang ingi ditinjau, diberikan oleh persamaan:

$$H_A = K' H_P \quad (8)$$

dimana  $K' = f(\theta, \beta, \frac{r}{L}) \quad (9)$

Nilai-nilai koefisien refraksi  $K'$  untuk berbagai harga  $\theta$ ,  $\beta$  dan  $r/L$  telah dihitung dan dibuatkan tabel oleh Wiegel dan dimuat pada berbagai buku Teknik Pantai.

**Refleksi** gelombang adalah peristiwa memantulnya gelombang yang menabrak dinding atau pantai. Gelombang datang yang tidak tegak lurus terhadap garis pantai akan dipantulkan kembali dengan sudut datang dan sudut kembali yang sama terhadap garis normal (tegak lurus) pantai, seperti bola bilyard terpantul di pinggir meja. Gelombang refleksi ini dapat menggerus pantai dan mengangkut material offshore atau longshore, terjadilah erosi pantai. Tinggi gelombang refleksi  $H_r$  bergantung kepada material yang ditabraknya, berongga atau padat, miring atau vertikal. Hubungan tinggi gelombang refleksi  $H_r$  dengan tinggi gelombang datang (*incident wave*)  $H_i$  dapat dinyatakan dengan rumus:

$$H_r = X H_i \quad (10)$$

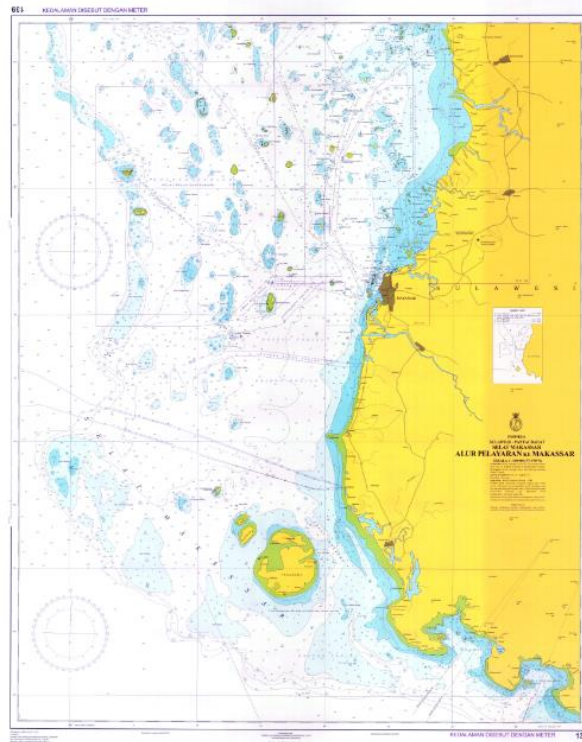
**Tabel 2.** Nilai koefisien refleksi X untuk berbagai keadaan bangunan (Sumber: Triatmodjo, 2010)

Tipe bangunan	X
Dinding vertikal dengan puncak di atas air	0,7 - 1,0
Dinding vertikal dengan puncak terendam	0,5 - 0,7
Tumpukan batu sisi miring	0,3 - 0,6
Tumpukan blok beton	0,3 - 0,5
Bangunan vertikal dengan peredam energi (diberi lobang)	0,05 - 0,2

Nilai koefisien refleksi  $X$  dapat dilihat di Tabel 2, hasil dari berbagai percobaan di laboratorium. Apabila gelombang datang tegak lurus dan menabrak dinding vertikal yang padat maka nilai  $X = 1$ , terjadilah yang disebut **standing wave**, yaitu keadaan refleksi yang sempurna sehingga tinggi gelombang refleksi sama dengan gelombang datang. Karena teori gelombang menyatakan tinggi gelombang superposisi adalah jumlah dari tinggi masing-masing gelombang berarti tinggi **standing wave** adalah dua kali tinggi gelombang datang. Keadaan ini sangat berbahaya bila terjadi dalam daerah pelabuhan, dapat merusak bangunan dan mengganggu operasi pelabuhan.

## SIMULASI DENGAN SMS

Walaupun berbagai tabel dan nomogram untuk rumus-rumus yang diuraikan di atas telah disiapkan guna memudahkan menghitung deformasi gelombang, keadaan seperti pantai Makassar hampir mustahil dapat dianalisis secara manual. Gambar 6 berikut ini memperlihatkan pantai Makassar yang ditaburi ratusan pulau dan *sand bars* sehingga berbagai proses deformasi gelombang seperti yang telah diuraikan di atas terjadi secara simultan dan beruntun. Oleh karena itu program paket komputer dicoba dipakai untuk menjawab masalah ini.



**Gambar 6.** Pantai Makassar yang ditaburi ratusan pulau dan sand bars (Sumber: Dishidros TNI AL, 2015)

Dalam hal ini dipakai paket program SMS 10,0. Arah datangnya gelombang dipakai sama dengan arah datangnya angin yang terbanyak yaitu Barat, Barat Laut dan Barat Daya. Besarnya gelombang yang dipakai adalah  $H = 3,0$  meter dari arah Barat Laut dan Barat Daya, sedang  $H = 2,3$  meter dari arah Barat; sengaja dipilih berbeda untuk melihat seandainya ada variasi dalam deformasi yang terjadi.

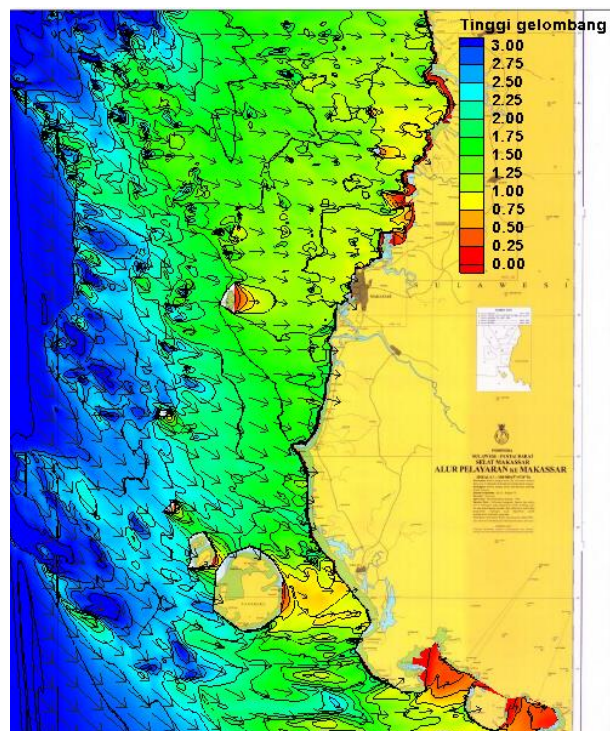
## HASIL

Hasil simulasi diperlihatkan pada Gambar 7, 8 dan 9 berturut-turut dari arah Barat Laut, Barat dan Barat Daya. Terlihat jelas dari gambar-gambar tersebut bahwa gelombang setinggi 3,0 meter tidak dapat mendekati pantai Makassar. Baik dari arah Barat Laut maupun Barat Daya mereka pecah pada daerah kedalaman yang sama. Gelombang setinggi 2,3 meter dari arah Barat terus melaju ke dekat pantai sebelum pecah dan dilanjutkan oleh gelombang yang lebih kecil sekitar 1,5 meter. Tetapi ada bahagian pantai yaitu daerah Barombong yang menerima gelombang sekitar 2,0 meter dari arah Barat ini; rupanya gelombang dari arah Barat kurang mengalami refraksi sehingga lebih berbahaya.

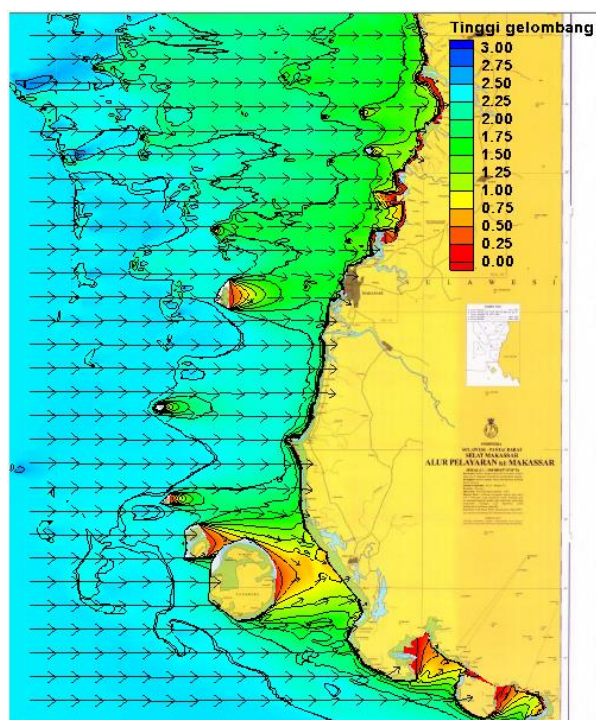
Gelombang yang lebih besar (3 meter) dari arah Barat Daya dan Barat Laut cukup banyak mengalami refraksi sehingga tingginya banyak berkurang. Tidak ada gelombang setinggi 2,0 meter dari arah Barat Daya dan Barat Laut yang dapat mencapai pantai. Daerah pantai Makassar sebelah Utara mulai dari daerah pelabuhan adalah lebih terlindung dengan gelombang “hanya” 0,75 sampai 1,0 meter, kecuali bila gelombang datang dari Barat keadaannya lebih berbahaya.



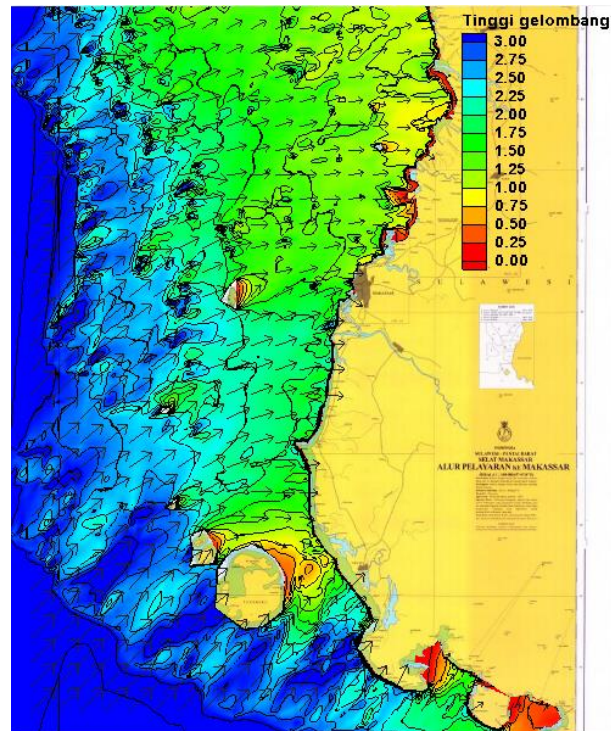
Untuk gelombang refleksi tampaknya semua mengarah ke Utara disebabkan oleh posisi pantai Makassar yang miring ke arah Timur Laut dan refraksi gelombang yang paling tidak mengarah dari Barat, umumnya dari Barat Daya.



**Gambar 7.** Hasil simulasi gelombang dari arah Barat Laut dengan tinggi gelombang  $H_s = 3,0$  meter



**Gambar 8.** Hasil simulasi gelombang dari arah Barat dengan tinggi gelombang  $H_s = 2,3$  meter



**Gambar 9.** Hasil simulasi gelombang dari arah Barat Daya dengan tinggi gelombang  $H_s = 3,0$  meter

## KESIMPULAN DAN SARAN

Hasil simulasi gelombang pantai Makassar dengan paket program SMS 10.0 cukup rasional dan realistis memberikan gambaran tentang bagaimana gelombang dari laut dalam ber-transformasi dan deformasi akibat morfologi baik lepas pantai maupun dekat pantai Makassar yang sangat unik, ditaburi ratusan pulau kecil dan topografi dasar laut yang tidak rata. Efek-efek refraksi, difraksi, shoaling, refleksi bahkan gelombang pecah cukup terlihat jelas pada peta-peta hasil simulasi.

Namun keakuratan hasil-hasil di atas masih perlu diuji lebih lanjut agar dapat memberikan manfaat yang sebesar-besarnya bagi perencanaan dan pelaksanaan bangunan-bangunan pantai yang efektif untuk kelestarian pantai Makassar.

## DAFTAR PUSTAKA

- CEM. 2011. *Coastal Engineers Manual*. Washington D.C.: Coastal Hydraulic Laboratory, US Army Corps of Engineers.
- CERC. 1984. *Shore Protection Manual*. Vicksburg, Missiisipi: Waterways Experiment Station, U.S. Army Corps of Engineers, .
- Rabung, Frans, and Naim Nurfan. 2012. "Pola angin pembangkit gelombang yang berpengaruh atas morfologi dan bangunan pantai di ekitar Makassar." *Prosiding Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin*, Desember.
- Rabung, Frans, Silman Pongmanda, and Ariningsih Suprpti. 2014. "Prediksi gelombang signifikan sekitar pantai Makassar untuk perencanaan pembangunan infrastruktur pantai." *Prosiding Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin*, Desember: TS2-1 - TS2.
- Triatmodjo, Bambang. 2010. *Perencanaan Pelabuhan*. Yogyakarta: Beta Offset.